УДК 532.528 + 532.574.7 + 532.582.32

ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ КАВИТАЦИОННЫХ КАВЕРН НА РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ОБТЕКАНИЯ ДВУМЕРНЫХ ГИДРОПРОФИЛЕЙ

Кравцова А.Ю., Маркович Д.М., Первунин К.С., Тимошевский М.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия
Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 10-08-01304-а) и Правительства Российской федерации (грант № 11.G34.31.0046, ведущий ученый – К. Ханъялич, ГОУ ВПО «Новосибирский государственный университет»).

АННОТАЦИЯ

В работе представлены результаты высокоскоростной визуализации кавитационных каверн с высоким пространственным разрешением. В результате были подробно описаны различные типы кавитационного обтекания пластины с закругленной носовой частью, гидрокрыла NACA0015 и каскада, состоящего из трех одинаковых крыльев NACA0015. Проведенный анализ экспериментальных данных позволил детально изучить динамику и пространственную структуру кавитационных каверн. В случае каскада было обнаружено, что пульсации каверны при облачном типе кавитационного обтекания на одном из крайних гидрокрыльев возбуждают пульсации ккаверн на двух других профилях каскада с той же частотой вследствие изменения поля давления.

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшими условиями безопасной и эффективной работы гидроэнергетических систем, как вновь создаваемых, так и уже эксплуатирующихся, являются надежность и долговечность используемого оборудования. Как правило, работа реальных энергетических агрегатов, таких как гидротурбины, и гидротехнических сооружений, например, подводящие тракты и отсасывающие трубы гидроэлектростанций, сопровождается наличием нестационарного турбулентного течения сложной геометрии, зачастую являющегося двухфазным. Повышение ресурса работы, увеличение КПД гидромашин, а главное – степени их безопасности, невозможно без изучения физических механизмов гидродинамических процессов, наиболее существенную роль, среди которых играют крупномасштабные вихревые структуры (КВС) и кавитация. Взаимодействие КВС с парогазовой дисперсной фазой является сложным нелинейным процессом, оказывающим существенное влияние на кавитационную эрозию элементов гидроагрегатов и на пульсационные характеристики течения вследствие взаимного влияния непрерывной фазы и частиц дисперсной фазы. На траектории частиц влияет локальная неравновесная турбулентность жидкости (турбулентная дисперсия), при этом движение пузырей оказывает существенное влияние на турбулентную структуру потока (модуляция турбулентности). Как известно, возникновение резонансных эффектов может приводить к чрезмерным вибрационным нагрузкам и, как следствие, выходу из строя гидроагрегатов или в худшем случае даже авариям и катастрофам. Кавитационная эрозия, в свою очередь, является одним из механизмов интенсивного износа рабочих колес гидротурбин и насосного оборудования, что существенно снижает их ресурс работы и увеличивает затраты на производство или потребление энергии. Как правило, кавитационной эрозии подвергаются определенные участки тыльных сторон лопаток, втулок и ободов рабочих колес, при этом остальная поверхность остается неповрежденной. Это обуславливается определяющей ролью пространственной структуры двухфазного течения на процесс кавитационной эрозии. Таким образом,

© Кравцова А.Ю., Маркович Д.М., Первунин К.С., Тимошевский М.В.

становится очевидным, что одновременное исследование динамики кавитационных каверн и КВС в нестационарных турбулентных течениях, реализующихся в элементах гидроагрегатов, распределений турбулентных характеристик, а также изучение взаимодействия КВС, развивающихся в сдвиговых слоях в жидкости, с парогазовой фазой являются крайне актуальными задачами с точки зрения совершенствования конструкций современного гидротехнического оборудования.

Сегодня в мировой литературе можно найти достаточно много экспериментальных работ, посвященных исследованию кавитирующих течений вблизи двумерных гидрокрыльев, из анализа которых известно, что все типы кавитации делятся на два основных класса: неполные или частичные каверны и суперкаверны (подробное описание можно найти, например, в работе [9]). В этой работе авторы также показали существенное влияние неблагоприятного градиента давления на формирование турбулентного следа. В [3] авторы изучали влияние температуры на условия возникновения различных типов кавитационных каверн и неустойчивостей.

Исследованию облачной кавитации также посвящено относительно большое количество экспериментальных работ. Авторы работы [8] показали, что облачная каверна состоит из крупномасштабного вихря, в центре которого сосредоточены кавитационные пузыри, заполненные парогазовой смесью. Во многих экспериментах (например [6]) было обнаружено, что колебания кавитационных каверн происходят при близких значениях числа Струхаля. Дальнейшие исследования доказали, что существует корреляция между отрывом кавитационных каверн и формированием возвратного течения в области замыкания каверны как результата действия обратного градиента давления (см. [2] и [7]).

В мировой литературе работ, посвященных исследованию кавитационного обтекания каскада гидрокрыльев, крайне мало. При этом в большинстве из них представлены результаты численного моделирования, а экспериментальные работы, направленные на изучение турбулентной структуры течений в подобных конфигурациях, фактически отсутствуют. [4] – одна из немногих экспериментальных работ, в которой была подробно изучена неустойчивость, присущая кавитирующему пропеллеру. С помощью визуальных наблюдений и измерения локального давления было показано, что амплитуда пульсаций давления, возникающих в результате появления автоколебаний кавитирующего пропеллера, крайне большая.

Из анализа мировой литературы можно заключить, что на сегодняшний день изучение кавитационного обтекания каскадов гидрокрыльев сводится, в основном, к численному моделированию данных течений. Число экспериментальных работ, направленных на исследование данного типа течений, крайне ограничено. Валидация математических моделей, используемых при численном моделировании, зачастую осуществляется на экспериментальных данных по обтеканию одиночного гидропрофиля, после чего эти модели экстраполируются на каскады гидрокрыльев путем наложения условий периодичности на границе.

Тем не менее, несмотря на большое количество работ по исследованию кавитирующих течений, до сих пор детальная информация, необходимая для оптимизации существующих математических моделей, крайне ограничена даже для упрощенных условий. С точки зрения развития и совершенствования современных численных методов, описывающих возникновение и развитие кавитации, основной интерес представляют исследования в канонических геометрических условиях (сопла Вентури, модельные профили, например крылья серий NACA, и т.п.) В связи с этим, получение систематической экспериментальной информации для различных кавитационных режимов обтекания модельных объектов крайне важно. Данная работа посвящена экспериментальному изучению нестационарного кавитационного обтекания одиночных двумерных модельных профилей и каскада гидрокрыльев.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводились на кавитационном гидродинамическом стенде Института теплофизики СО РАН., подробное описание которого можно найти в работе [10]. Для анализа пространственной структуры и динамики паровых каверн была проведена высокоскоростная визуализация течений камерой PHOTRON FASTSCAN SA5 с частотой 20 кГц. Условия эксперимента были такими же, как и в работе [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ

На Рис.1 и Рис.2 представлены характерные типы кавитационных каверн, возникающих на поверхности гидропрофилей.

При кавитационном обтекании пластины каверна начинает зарождаться при числах кавитации около σ=2,56. На данном режиме каверна является пленочной (см. Рис.1-а.1 и Рис.2-а.2), ее длина составляет C/L=0,07. Как можно видеть, каверна является квазидвумерной и имеет ярко выраженную стриковую структуру, подобная структура была ранее зарегистрирована и описана в работе [1]. Характерное расстояние между стриками составляет 1,5% от длины пластины. В отличие от работ других авторов (к примеру [5]), в данной работе в области замыкания пленочной каверны происходил отрыв небольших пузырьковых кластеров. Это, вероятно, связано как с относительно большой шероховатостью поверхности профилей, так и высоким содержанием растворенного в воде воздуха. При уменьшении числа кавитации до σ=1,92 тип каверны меняется на переходный, ко-

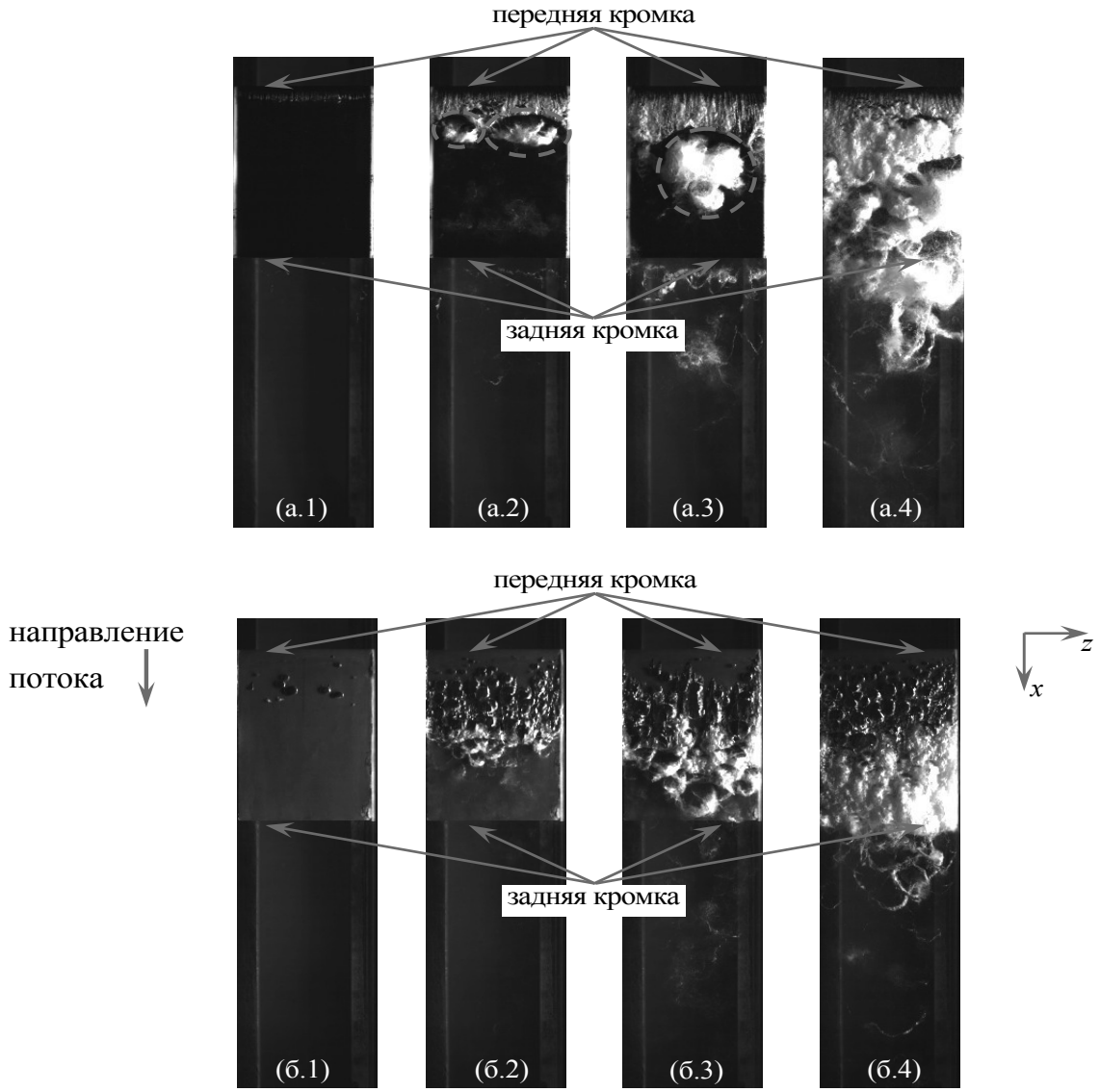

Рис.1 Мгновенные фотографии кавитационных каверн (вид сверху), возникающих при обтекании (а) пластины с закругленной носовой частью при (1) σ = 2,56, C/L = 0,07; (2) σ = 1,92, C/L = 0,23; (3) σ = 1,56, C/L = 0,5, Sh = 0,32; (4) σ = 1,29, C/L = 1,1, Sh = 0,47 и (б) гидрокрыла NACA0015 при (1) σ = 1,36, C/L = 0,22; (2) σ = 1,22, C/L = 0,5; (3) σ = 1,05, C/L = 1; (4) σ = 0,96, C/L = 1,1, Sh = 0,18.

торый характеризуется отрывами относительно больших облаков (обведены пунктирными линиями на Рис.1-а.2) в различных зонах области замыкания каверны. В данном случае пространственная структура каверны становится уже в существенной степени трехмерной. На данном режиме обтекания длина каверны увеличивается до C/L = 0,23. Вниз по потоку с увеличением локального давления пузыри схлопываются, и концентрация паровой фазы уменьшается.

Дальнейшее уменьшение числа кавитации приводит к переходу к облачному типу кавитационного обтекания, отличительной особенностью которого является отрыв практически всей каверны в виде одного крупномасштабного облака, поперечный размер которого сопоставим с шириной рабочего канала (см. Рис.1-а.3 и Рис.1-а.4). Как хорошо известно, отрыв облака от поверхности гидрокрыла сопровождается появлением циркуляции жидкости, что в результа-

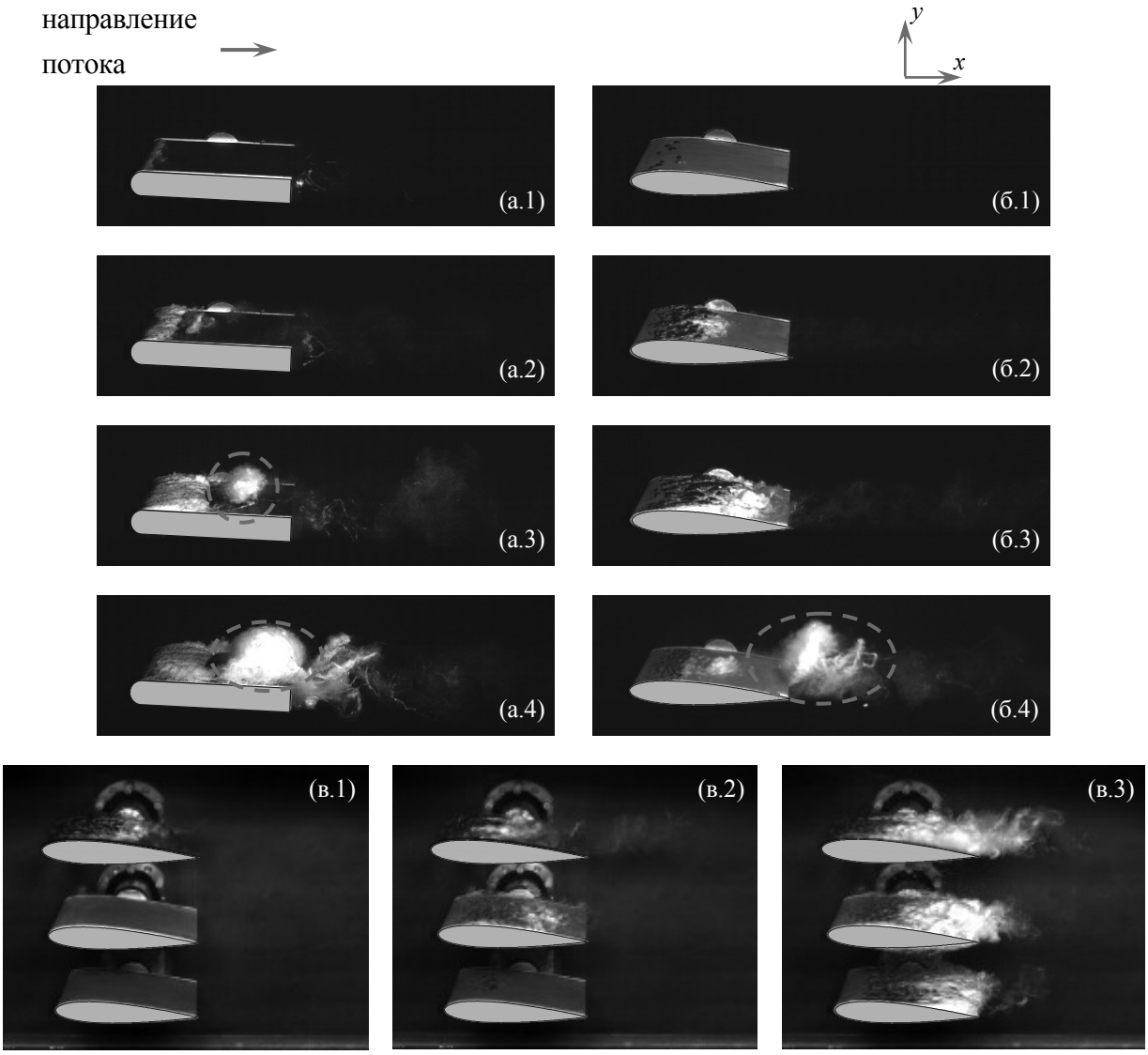

Рис.2 Мгновенные фотографии кавитационных каверн (вид под углом 25°), возникающих при обтекании (а) пластины с закругленной носовой частью при (1) σ = 2,56, C/L = 0,07; (2) σ = 1,92, C/L = 0,23; (3) σ = 1,56, C/L = 0,5, Sh = 0,32; (4) σ = 1,29, C/L = 1,1, Sh = 0,47, (б) гидрокрыла NACA0015 при (1) σ = 1,36, C/L = 0,22; (2) σ = 1,22, C/L = 0,5; (3) σ = 1,05, C/L = 1; (4) σ = 0,96, C/L = 1,1, Sh = 0,18 и (в) каскада гидропрофилей NACA0015 при (1) σ = 1,54 (ξ = 1,13); (2) σ = 1,39 (ξ = 0,98), C/L = 0,6, Sh = 0,12; (3) σ = 1,3 (ξ = 0,94), C/L = 0,92, Sh = 0,12.

те приводит к образованию крупномасштабного вихря вокруг оторвавшегося облака. Когда σ = 1,29, размер каверны возрастает до C/L = 1,1. Соответствено увеличивается и размер отрывающихся облаков. При этом на малых углах атаки пространственная структура этих облаков не является однородной. На Рис.1-а.4 можно наблюдать разрывы в пространственной структуре кавитационного облака. Кроме того, на всех представленных режимах на Рис.1-а и Рис.2-а можно наблюдать кавитацию в ядре поперечного вихревого жгута в следе за задней кромкой пластины. С уменьшением числа кавитации вихревая кавитация становится более выраженной. Также в следе за пластиной, но ниже по течению стохастически появляются продольные стрики (вихревые жгуты в продольном направлении, в ядрах которых происходит кавитация).

В случае гидрокрыла NACA0015 картина обтекания существенно преобразуется. Сначала при σ = 1,36 вблизи передней кромки гидрокрыла на расстоянии около C/L = 0,22 образуются отдельные микроскопические пузыри, заполненные газопаровой смесью (см. Рис.1-б.1). Эти пузыри постепенно перемещаются вниз по течению со скоростью 15,6 м/с, что очень близко к скорости потока в данной области, причем их размер также постепенно увеличивается. Скорость роста пузырей составляет примерно 4,5 м/с. Подобная динамика роста и перемещения пузырей наблюдается до тех пор, пока пузыри не пересекают некоторую невидимую линию на расстоянии приблизительно C/L = 0,27 от передней кромки гидрокрыла, после чего происходит их схлопывание (см. Рис.1-б.1 и Рис.2-б.1). Таким образом, можно предполагать, что вдоль этой невидимой линии давление локально достигает того значения, которое является достаточным для коллапса кавитационных пузырей. Данный тип

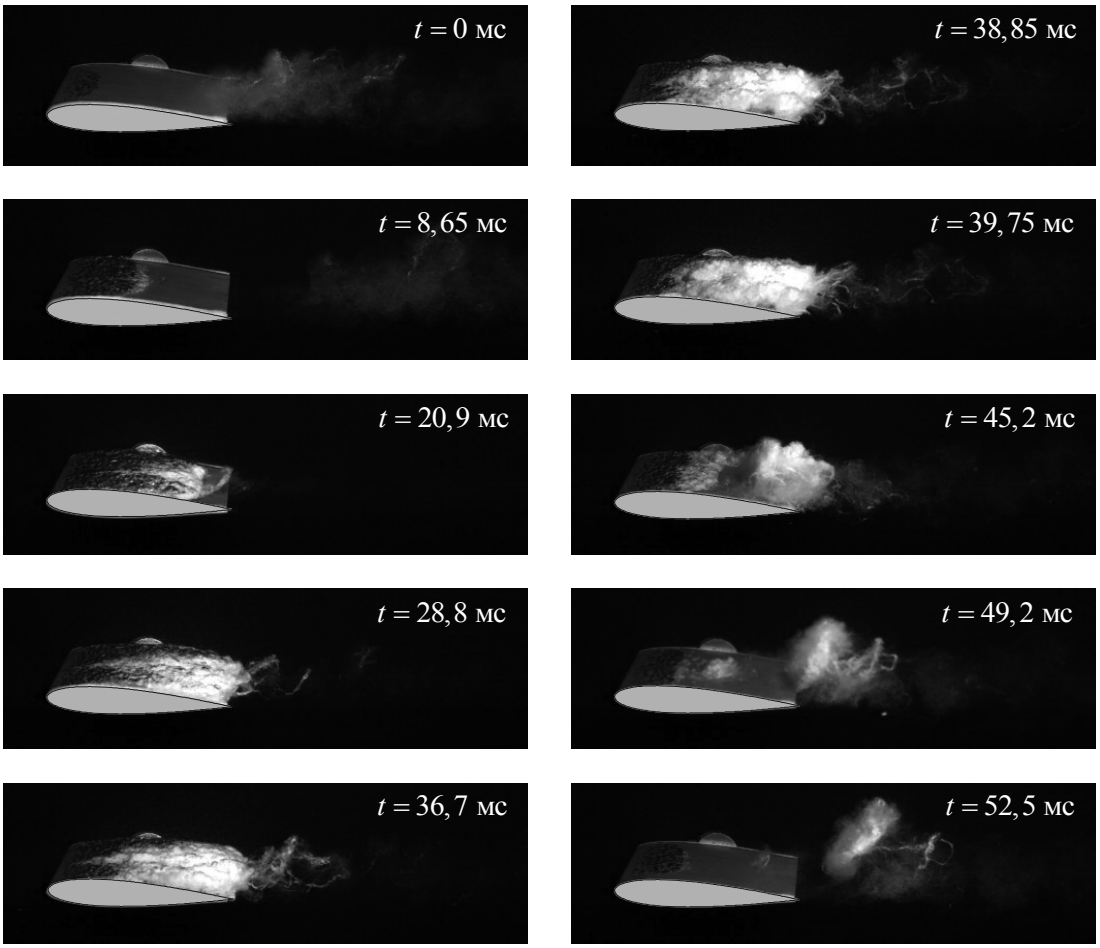

Рис.3 Эволюция газопаровой каверны (вид под углом 25°) при облачном типе кавитацион ного обтекания гидрокрыла NACA0015 в течение одного периода. σ = 0,96, C/L = 1,1, Sh = 0,18. Продолжительность периода 53,75 мс. α = 3°.

кавитационного обтекания можно рассматривать как присоединенную пузырьковую кавитацию. В данном случае каверна еще не является сформированной. При меньших числах кавитации (см. Рис.1-б.2 и -б.3 и Рис.2-б.2 и -б.3) можно наблюдать переходный тип обтекания. В данном случае каверна является уже сформировавшейся. Как и на предыдущем режиме можно видеть, что от передней кромки каверны и до ее середины также образуются микроскопические пузыри, которые смещаются и растут вниз по потоку. Здесь стоит отметить, что, поскольку каверна фактически состоит из отдельных газопаровых пузырей различных размеров (начиная с практически нулевых размеров и заканчивая пузырями с радиусом r/L = 0,07), передняя кромка каверны изогнута в отличие от случая с пластиной (ср. например Рис.1-а.2 и Рис.1-б.2). В области замыкания каверны можно наблюдать схлопывание этих пузырей, заполняющих каверну, и несколько ниже по потоку отрыв подковообразных облаков, которые, судя по всему, находятся в центрах вихревых структур и повторяют их форму. При достижении режима σ = 0,96 тип обтекания является облачным: отрыв каверны происходит квазипериодически. Однако, как и в случае переходного режима, можно видеть отрывы подковообразных облаков одновременно с отрывом крупномасштабного облака. Причем значения числа Струхаля в случае гидрокрыла в 2-3 раза ниже, чем в случае пластины.

На Рис.3 показана временная развертка в течение одного периода отрыва каверны на облачном режиме кавитационного обтекания. В нулевой момент времени каверна имеет минимальную длину C/L = 0,21. С этого момента времени каверна начинает расти. При t = 8,65 мс начинаются отрывы мелких кавитационных облаков в области замыкания каверны. При t = 20,9 мс становится отчетливо видно возвратное течение под каверной. При t = 28,8 мс задняя кромка каверны достигает задней кромки гидрокрыла. При t = 36,7 мс каверна достигает своего максимального размера C/L = 1,1. Далее при t = 38,85 мс происходит отрыв каверны от поверхности гидрокрыла в результате разрушения межфазной границы возвратным течением вблизи передней кромки каверны. В дальнейшем наблюдается унос оторвавшегося крупномасштабного облака вниз по потоку.

При обтекании каскада (см. Рис.2-в) каверна сначала возникает на верхнем профиле при σ = 1,54, передняя кромка которого расположена наиболее близко к стенке рабочего канала. Режим кавитации при этом является переходным. Длина каверны составляет около 0,5-0,7L. На среднем гидрокрыле возникают отдельные зоны локализации пузырьковой кавитации, на нижнем профиле кавитация отсутствует. При уменьшении σ до 1,39 тип кавитации на верхнем профиле изменяется на облачный, а максимальная длина каверны достигает уже примерно 0,9-1,0L. На данном режиме также присутствует каверна переходного типа на среднем профиле, ее длина составляет примерно 0,6L, на нижнем профиле – пленочная каверна длиной 0,2L. Необходимо заметить, что пульсации длины каверны на верхнем гирокрыле приводят к появлению пульсаций каверн на двух других гидрокрыльях из-за изменения поля давления в области каскада. Хотя каверны пленочного и переходного типов являются устойчивыми сами по себе, о чем можно судить по обтеканию одиночного гидрокрыла. При дальнейшем уменьшении числа кавитации до σ = 1,3 на всех профилях наблюдается кавитация облачного типа. Длина каверны на верхнем профиле составляет примерно 0,96L, а на среднем – 0,92L, на нижнем – 0,9L. Причем в этом и предыдущем случаях пульсации каверн происходят не синхронно, а с запаздыванием примерно на 10 мс, а число Струхаля для каверны на среднем профиле составляет около Sh = 0,12.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе полученных визуальных данных подробно описаны типы кавитационного обтекания всех трех объектов. Показано, что типы обтекания пластины и гидрокрыла существенно отличаются. Развитие каверны до облачной кавитации в случае гидрокрыла происходит существенно быстрее, а размер каверны становится значительно больше, что соответственно ведет к формированию более крупных облаков при отрыве каверны.

Обнаружено, что в случае каскада кавитационная каверна начинает зарождаться на одном из крайних гидрокрыльев, что, вероятно, связано с влиянием стенки рабочего канала. Пульсации каверны при облачном типе кавитационного обтекания на одном из крайних гидрокрыльев возбуждают пульсации ккаверн на двух других профилях каскада с той же частотой вследствие изменения поля давления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Brandner P.A., Walker G.J., Niekamp P.N., Anderson B. An experimental investigation of cloud cavitation about a sphere // J. Fluid Mech. – 2010. – Vol. 656. – P. 147 – 176.
2. Callenaere M., Franc J.-P., Michel J.-M., Riondet M. The cavitation instability induced by the development of a re-entrant jet // J. Fluid Mech. – 2001. – Vol. 444. – P. 223 – 256.
3. Cervone A., Bramanti C., Rapposelli E., d'Agostino L. Thermal cavitation experiments on a NACA 0015 hydrofoil // J. Fluids Eng. – 2006. – Vol. 128. – P. 326 – 331.
4. Duttweiler M.E., Brennen C.E. Surge instability on a cavitating propeller // J. Fluid Mech. – 2002. – Vol. 458. – P. 133 – 152.
5. Franc J.P., Michel J.M. Attached cavitation and the boundary layer: experimental investigation and numerical treatment // J. Fluid Mech. – 1985. – Vol. 154. – P. 63 – 90.
6. George D.L., Iyer C.O., Ceccio S.L. Measurement of the bubbly flow beneath partial attached cavities using electrical impedance probes // J. Fluids Eng. – 2000. – Vol. 122. – P. 151 – 155.
7. Kawakami D.T., Fuji A., Tsujimoto Y., Arndt R.E.A. An assessment of the influence of environmental factors on cavitation instabilities // J. Fluids Eng. – 2008. – Vol. 130. – P. (031303)-8.
8. Kubota A., Kato H., Yamaguchi H., Maeda M. Unsteady structure measurement of cloud cavitation on a foil section using conditional sampling technique // J. Fluids Eng. – 1989. – Vol. 111. – P. 204 – 210.
9. Laberteaux K.R., Ceccio S.L. Partial cavity flows. Part 1. Cavities forming on models without spanwise variation // J. Fluid Mech. – 2001. – Vol. 431. – P. 1 – 41.
10. Кравцова А.Ю., Маркович Д.М., Первунин К.С., Тимошевский М.В. Измерение турбулентных характеристик кавитирующих течений вблизи двумерных гидропрофилей методом Particle Image Velocimetry // Труды X научной международной конференции "Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики". – Алушта, 2012.